

Денис Андреевич Сотников^{1*}, Константин Юрьевич Окишев^{1}**

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

**Denis.Sotnikov@at.urfu.ru*,

***Konstantin.Okishev@urfu.ru*

ОЦЕНКА СКОРОСТЕЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ТОРЦЕВОЙ ЗАКАЛКЕ ПО ДАННЫМ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ДИАГРАММ

Представлен анализ скорости охлаждения при торцевой закалке образца по Джомини с использованием данных термокинетических диаграмм распада переохлаждённого аустенита сталей. Для выяснения возможной точности прогнозирования кривых прокаливаемости проведено сопоставление твёрдости при известных скоростях охлаждения, которые можно рассчитать по термокинетической диаграмме, с положением на торцевом образце, где достигается аналогичная твёрдость. Показано, что определённые таким образом скорости охлаждения в разных точках торцевого образца в целом согласуются с данными прямых измерений, хотя в отдельных случаях наблюдаются заметные (в 2–3 раза) отклонения.

Ключевые слова: сталь, прокаливаемость, торцевая закалка, метод Джомини, скорость охлаждения, диаграммы распада аустенита.

Denis A. Sotnikov, Konstantin Yu. Okishev

ESTIMATION OF COOLING RATES IN END-QUENCH TEST WITH THE DATA FROM CCT DIAGRAMS

Cooling rates in Jominy end-quench test are analyzed using the data taken from continuous cooling transformation (CCT) diagrams of austenite decomposition in steels. Hardness after cooling with a known rate that can be calculated by CCT diagram was correlated with the position on an end-quenched specimen where the same hardness was achieved. This provided an estimate of possible accuracy of model calculation of hardenability curves. In general, cooling rates at various distances from the quenched end determined in this way are close to the results of direct measurements, though in some cases considerable differences (2 to 3 times) can be observed.

Keywords: steel, hardenability, end-quench test, Jominy test, cooling rate, austenite transformation diagrams.

Прокаливаемость как свойство стали характеризуют глубиной закалённой зоны (расстоянием от охлаждаемой поверхности до точки, где количество мартенсита или твёрдость уменьшается до заданного уровня), получаемой при данной скорости охлаждения поверхности. В качестве стандартного метода, позволяющего сравнивать различные стали по

прокаливаемости, широко используется торцевая закалка по Джомини, при которой предварительно нагретый цилиндрический образец охлаждается с торца струёй воды под напором. После полного охлаждения измеряется твёрдость на разных расстояниях от охлаждаемого торца и строится кривая прокаливаемости. Это метод стандартизован во многих странах, включая РФ (ГОСТ 5657-69).

Развитие методов прогнозирования свойств сталей требует создания и методов прогнозирования кривых торцевой прокаливаемости. Для этого необходимо сопоставлять твёрдость, которую сталь приобретает при охлаждении из аустенитного состояния с заданной скоростью, с положением точки в торцевом образце, в которой достигается такая же скорость. В литературе часто цитируются результаты прямого измерения скоростей охлаждения по длине стандартного образца Джомини, первоначально приведённые в [1]. Их подтверждают и последующие эксперименты [2]. И. Тамурой с сотр. [3, 4] было предложено аналитическое выражение для скорости охлаждения v (К/с) в зависимости от расстояния до охлаждаемого водой торца образца J (мм), которое в случае аустенитизации при 880 °С и температуры охлаждающей воды 20 °С приводит к формулам:

$$v_7 = \frac{475}{J^{1,4}}; \quad (1)$$

$$v_{8/5} = 300 \cdot \left(\int_{500}^{800} \frac{dT}{v} \right)^{-1} = \frac{431}{J^{1,4}}. \quad (2)$$

Здесь v_7 — «мгновенная» скорость охлаждения при 700 °С, а $v_{8/5}$ — средняя скорость охлаждения в интервале 800 – 500 °С. Как видно из рисунка, эти формулы хорошо согласуются с результатами [1, 2].

При моделировании прокаливаемости естественным путём является вначале определить, какой будет структура и твёрдость стали после охлаждения с той или иной скоростью, а затем принять, что такая же твёрдость будет получена в той точке торцевого образца, в которой обеспечивается такая же скорость охлаждения.

Для оценки степени точности, которая может быть достигнута при таком подходе, в данной работе экспериментальные данные о твёрдости, получаемой при непрерывном охлаждении, сравниваются с экспериментальными же кривыми прокаливаемости.

В качестве источника данных использован атлас [5], в котором одновременно приводятся термокинетические диаграммы распада аустенита и кривые торцевой прокаливаемости для ряда сталей. Важно, что в каждой такой паре использовалась одна и та же плавка стали и одна и та же температура аустенитизации. Три такие же пары диаграмм приведены в [6].

Для каждой стали (плавки):

1) для каждой кривой охлаждения на термокинетической диаграмме определялась средняя скорость охлаждения $v_{8/5} = 300 / (t_{500} - t_{800})$, где t_{800} и t_{500} — время достижения температуры 800 и 500 °С соответственно;

2) находилась точка на кривой прокаливаемости, в которой была получена такая же твёрдость и, следовательно, такой же должна была быть скорость охлаждения.

Определённые таким образом скорости охлаждения в зависимости от расстояния до охлаждаемого торца при торцевой закалке приведены на рисунке. Всего были обработаны данные для 19 сталей из [5] и 3 сталей из [6]. Все стали содержали от 0,13 до 0,73 %С; наиболее легированной была сталь типа 18Х2Н2. Для 7 из 19 сталей на термокинетических диаграммах были приведены значения твёрдости HV, и для сопоставления с приведённой на кривых прокаливаемости твёрдостью HRC приходилось прибегать к пересчёту, который мог служить источником дополнительной погрешности; эти данные указаны на рисунке не точками (5), а крестиками (7).

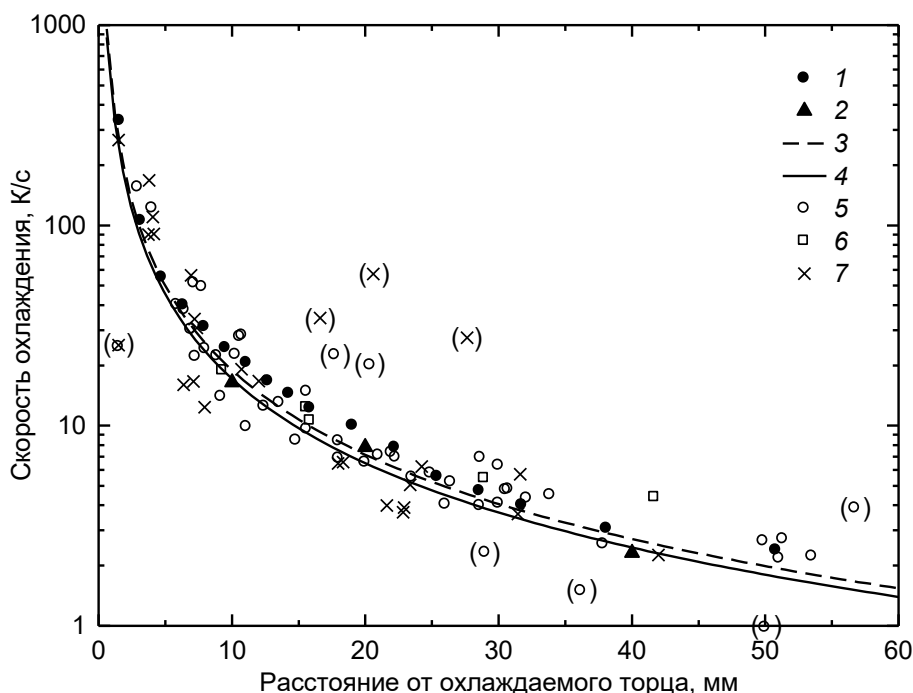


Рисунок. Скорости охлаждения в различных точках образца Джомини.

- 1, 2 – результаты термометрирования [1, 2 соответственно];
- 3, 4 – результаты расчёта по формулам (1) и (2) соответственно;
- 5–7 – данные, полученные из сопоставления термокинетических диаграмм и кривых прокаливаемости (5 – данные [5], 6 – данные [6], 7 – данные [5] с пересчётом твёрдости из шкалы HV в шкалу HRC).
- 1, 3 – скорость при 700 °С; 2, 4–7 – средняя скорость в интервале 800–500 °С

Как видно из рисунка, скорости охлаждения, полученных путём сопоставления кривых прокаливаемости с термокинетическими диаграммами, в целом согласуются с известными результатами прямых измерений, хотя изредка наблюдаются отклонения в 2–3 раза в бóльшую или меньшую

сторону. При определении твёрдости путём пересчёта из шкалы Виккерса в шкалу Роквелла эти отклонения в отдельных случаях могут быть даже больше. Поэтому при расчёте кривых прокаливаемости на основе моделирования кинетики распада аустенита при непрерывном охлаждении вряд ли можно ожидать лучшего уровня погрешности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Jominy end-quench test. Notes on the interpretations of results. // *The Iron and Coal Trades Review*. 1943. Vol. 146. No. 3922. P. 633–635.
2. Ануфриев, Н.П. Расчётно-экспериментальное моделирование диффузионного распада переохлаждённого аустенита доэвтектоидных конструкционных сталей: Дисс. ... канд. техн. наук / Н.П. Ануфриев. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 149 с.
3. Токихиро, Ё. Оценка прокаливаемости по Джомини на основе базовой кривой охлаждения / Ё. Токихиро, И. Тамура // *Тэцу то хаганэ*. 1974. Т. 60. № 12. С. 1639–1645.
4. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.60.12_1639
5. Umemoto, M. Prediction of hardenability from isothermal transformation diagrams / M. Umemoto, N. Nishioka, I. Tamura // *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1982. V. 22. No. 8. P. 629–636.
6. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.22.629>
7. *Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle* / F. Wever [u. a.]. Düsseldorf: Verlag Stahleisen m.b.H., 1961.
8. Ludyga, J. Regulowane chłodzenie walcówki Ø18 mm na łańcuchy górnicze ze stali 23GHNMA / J. Ludyga, M. Mazurkiewicz, M. Białecki // *Hutnik*. 1981. T. 48. Nr 2. Str. 66–76.

REFERENCES

1. Jominy end-quench test. Notes on the interpretations of results. *The Iron and Coal Trades Review*, 1943, vol. 146, no. 3922, pp. 633–635.
2. Anufriev N.P. [Calculation and Experimental Modelling of Diffusional Decomposition of Supercooled Austenite of Hypoeutectoid Structural Steels]. Cand. diss. Ekaterinburg, 2011. 149 p. (in Russ.)
3. Tokihiro Y., Tamura I. [Estimation of Jominy hardenability curve by master cooling curve]. *Tetsu-to-hagané*, 1974, vol. 60, no. 12, pp. 1639–1645. (in Jap.) https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.60.12_1639
4. Umemoto M., Nishioka N., Tamura I. Prediction of hardenability from isothermal transformation diagrams. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1982, v. 22, No. 8, pp. 629–636.
5. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.22.629>
6. Wever F., Rose A., Peter W., Strassburg W., Rademacher L. *Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen m.b.H., 1961.
7. Ludyga J., Mazurkiewicz M., Białecki M. Regulowane chłodzenie walcówki Ø18 mm na łańcuchy górnicze ze stali 23GHNMA. *Hutnik*, 1981, vol. 48, no. 2, pp. 66–76.